

ZUVERLÄSSIGKEITSUNTERSUCHUNGEN ZUM BEDEUTUNGSFAKTOR UND ZUR ERDBEBENKARTE IN DER DIN EN 1998-1/NA

Nicholas Clemett¹ und Max Gündel²

¹ Lehrstuhl für Stahlbau und Stahlwasserbau, Helmut-Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,
nicholas.clemett@hsu-hh.de

² Lehrstuhl für Stahlbau und Stahlwasserbau, Helmut-Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg,
max.guendel@hsu-hh.de

KURZFASSUNG

2021 wurde in Deutschland der überarbeitete Nationale Anhang zur DIN EN 1998-1 mit einer viel diskutierten, neuen Erdbebekarte veröffentlicht. Die Höhe der Erdbebeneinwirkungen für ein Bauwerk an einem Standort resultiert aus der vom Baugrund abhängigen Spektrenform sowie dem Produkt aus der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung (a_{gR}) und dem Bedeutungsbeiwerte des Bauwerks (γ_I). Die Bedeutungsbeiwerte werden verwendet, um das Zuverlässigkeitsniveau von Bauwerken an deren Schadenspotential anzupassen. Nach DIN EN 1998-1 sollte γ_I einer entsprechenden Wiederkehrperiode zugeordnet sein, wobei der funktionale Zusammenhang auf einer log-linearen Näherung der Gefährdungskurve basiert und von der Steigung der Gefährdungskurve, k , abhängt. Die Norm schlägt einen k -Wert gleich 3,0 vor; in Deutschland sind jedoch Werte zwischen 1,5 und 2,1 üblich. Wenn nun ein konstantes γ_I mit einem k -Wert gleich 3,0 verwendet wird, wird a_g in Deutschland unterschätzt. Außerdem sind mit diesem Ansatz die Wiederkehrperiode der entsprechenden a_g -Werte unterschiedlich. Das entspricht nicht der Philosophie des Eurocode 8, welche auf dem Konzept der einheitlichen Gefährdung beruht. Diese Studie untersucht, wie die γ_I -Werte aus der DIN EN 1998-1/NA das Zuverlässigkeitsniveau von Bauwerken aus verschiedenen Bedeutungskategorien beeinflussen. Es hebt die Vorteile der Klassifizierung der Bedeutungskategorien auf Basis der mittleren Versagenshäufigkeit anstatt mit (konstantem) γ_I hervor. Ferner werden risikobasierte Erdbebekarten erstellt, um zu zeigen, wie verschiedenen Zielzuverlässigkeiten die Größe a_g und die Gebiete, in denen eine Erdbebenauslegung notwendig ist, beeinflussen.

Schlagwörter: Erdbeben, Bedeutungsfaktor, Zuverlässigkeit, Risiko, Erdbebekarte

1. EINFÜHRUNG

In den aktuell genormten seismischen Auslegungsverfahren spielen die Bedeutungskategorien und die entsprechenden Bedeutungsfaktoren, γ_I , eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit der ausgelegten Bauwerke. Der Bedeutungsfaktor wird mit der Referenz-Bodenbeschleunigung, a_{gR} , in der Gleichung

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} \quad (1)$$

multipliziert, um die Bemessungs-Bodenbeschleunigung, a_g , zu bestimmen. Bauwerke mit einer höheren Bedeutungskategorie haben einen höheren Bedeutungsbeiwert γ_I , sodass die Bemessungs-Beschleunigung und damit die Kapazität der Bauwerke erhöht wird. Die Bedeutungsfaktoren der vier Bedeutungskategorien von DIN EN 1998-1/NA [1] sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Bedeutungskategorien, entsprechende Bedeutungsfaktoren von DIN EN 1998-1/NA [1] und T_L gerechnet nach DIN EN 1998-1[2]

Bedeutungs-kategorie	Beschreibung	γ_I	Wiederkehrperiode, T_L [Jahre] mit $k = 3,0$
I	Bauwerke mit geringer Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit	0,8	243
II	Normale Bauwerke nicht in anderen Kategorien	1,0	475
III	Bauwerke, von deren Versagen bei Erdbeben eine große Zahl von Personen betroffen ist (z.B. Schulen, Kaufhäuser, usw.)	1,2	821
IV	Bauwerke, deren Funktionsfähigkeit nach einem Erdbeben von hoher Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist (z.B. Krankenhäuser)	1,4	1303

Nach DIN EN 1998-1 [2] besteht für γ_I folgender Zusammenhang:

$$\gamma_I = \left(\frac{T_{LR}}{T_L} \right)^{-\left(\frac{1}{k_1} \right)} \quad (2)$$

worin T_{LR} die Wiederkehrperiode der Referenz-Erdebeneinwirkung (475 Jahre), T_L die Wiederkehrperiode der ausgewählte Erdbebeneinwirkung (z.B. 1500 Jahre) und k_1 die Steigung der log-linearen, vereinfachten seismischen Gefährdungsfunktion ist. Nach DIN EN 1998-1 liegt der k_1 -Wert im Allgemeinen bei 3,0. Die damit für die γ_I -Werte der DIN EN 1998-1/NA [1] ermittelten Wiederkehrperioden sind in Tabelle 1 dargestellt.

Weil der Bedeutungsfaktor und die Steigung der Gefährdungskurve zusammenhängen, führt die Verwendung eines konstanten Bedeutungswerts in Gleichung (1) nur dann zu Erdbebeneinwirkungen mit derselben Wiederkehrperiode über mehrere Standorte, wenn sie denselben k_1 -Wert haben wie der, der zur Bestimmung des γ_I in die erste Instanz z.B. $k = 3,0$ verwendet wurde.

In der Realität hat jeder Standort wegen der räumliche Veränderlichkeit der seismische Gefährdung einen unterschiedlichen k_1 -Wert. Das bedeutet, dass bei Verwendung konstanter Bedeutungsfaktoren, die Wiederkehrperiode der Bemessungs-Bodenbeschleunigung nicht einheitlich ist. Das entspricht nicht der Philosophie der DIN EN 1998-1 [2], welche auf dem Konzept der einheitlichen Gefährdung beruht. Zudem hat es einen Einfluss auf die zu erwartende Zuverlässigkeit der ausgelegte Bauwerke.

In dieser Studie wird der Einfluss der Bedeutungsfaktoren und die seismischen Gefährdung auf die Zuverlässigkeit von Bauwerken in Deutschland untersucht. Als erstes wird der Einfluss der seismischen Gefährdung in Deutschland auf die Bedeutungsfaktoren und die Größe der Bemessungs-Bodenbeschleunigung untersucht. Als zweites wird die Zuverlässigkeit von Bauwerken, die mit Bedeutungsfaktoren nach DIN 1998-1/NA ausgelegt wurden, mit denen verglichen, die auf dem Konzept einer einheitlichen Gefährdung ausgelegt wurden. Als drittes wird das Konzept der zuverlässigkeitorientierten Auslegung eingeführt und diskutiert, wie es verwendet werden kann, um eine einheitliche Zuverlässigkeit von Bauwerken zu erreichen. Schließlich werden zuverlässigkeitsbasierte Erdbebenkarten beispielsweise für Deutschland ermittelt.

2. EINFLUSS DER SEISMISCHE GEFÄHRDUNG AUF DEN BEDEUTUNGSFAKTOR

2.1. Grundlagen

Die Gefährdungsfunktion $H(a_{gR})$ beschreibt die Überschreitungshäufigkeit eines Intensitätsparameters in Abhängigkeit von der Intensität. Sie werden mit probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen ermittelt und folgen aus der Art und Entfernung der Erdbeben. In der Regel sind die Gefährdungsfunktionen nicht analytisch darstellbar. Sie können aber durch eine Näherungsfunktionen dargestellt werden. Die einfachste Näherung ist eine Potenzfunktion [3]:

$$H(a) = k_0 a^{-k_1} \quad (3)$$

worin a die Spitzen-Bodenbeschleunigung als Intensitätsparameter bezeichnet sowie k_0 und k_1 Parameter der Gefährdungsfunktion sind. Die Potenzfunktion ist linear in log-log Raum und wird auch „log-lineare Gefährdungsfunktion“ genannt. Der Faktor k_0 spiegelt das Intensitätsniveau eines Standorts wider, während der Exponent k_1 die Streuung der Erdbebeneinwirkung beschreibt. So ergibt ein kleiner Exponent eine flache Neigung der Gefährdungsfunktion, was einer hohen Streuung entspricht.

2.2. Seismische Gefährdungsfunktionen in Deutschland

Die seismische Gefährdungsmodelle, die in DIN EN 1998-1/NA [1] verwendet werden, wurden von Grünthal et al [4] erstellt. Von den Ergebnissen der probabilistische Gefährdungsanalyse werden es für Standorte in Deutschland eine eindeutig Spitzen-Bodenbeschleunigung für Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 10% und 2% in 50 Jahre angegeben [5], was einer Wiederkehrperiode von ungefähr 475 Jahren bzw. 2475 Jahren entspricht. Über die Spitzen-Bodenbeschleunigung für zwei Wiederkehrperioden können die k_0 -Werte und k_1 -Werte für jeden Standort ermittelt werden. Der arithmetische Mittelwert der 475 Jahre Spitzen-Bodenbeschleunigung und die entsprechenden k_1 -Werte für Standort in Deutschland werden in Abbildung 1 dargestellt. Nur Standorte mit einer 475 Jahre Spitzen-Bodenbeschleunigung größer als $0,01 \text{ m/s}^2$ werden gezeigt. In Abbildung 1 ist klar zu sehen, dass der k_1 -Werte in Deutschland viel niedriger ist als der in der DIN EN 1998-1 vorgeschlagene k_1 -Wert gleich 3,0.

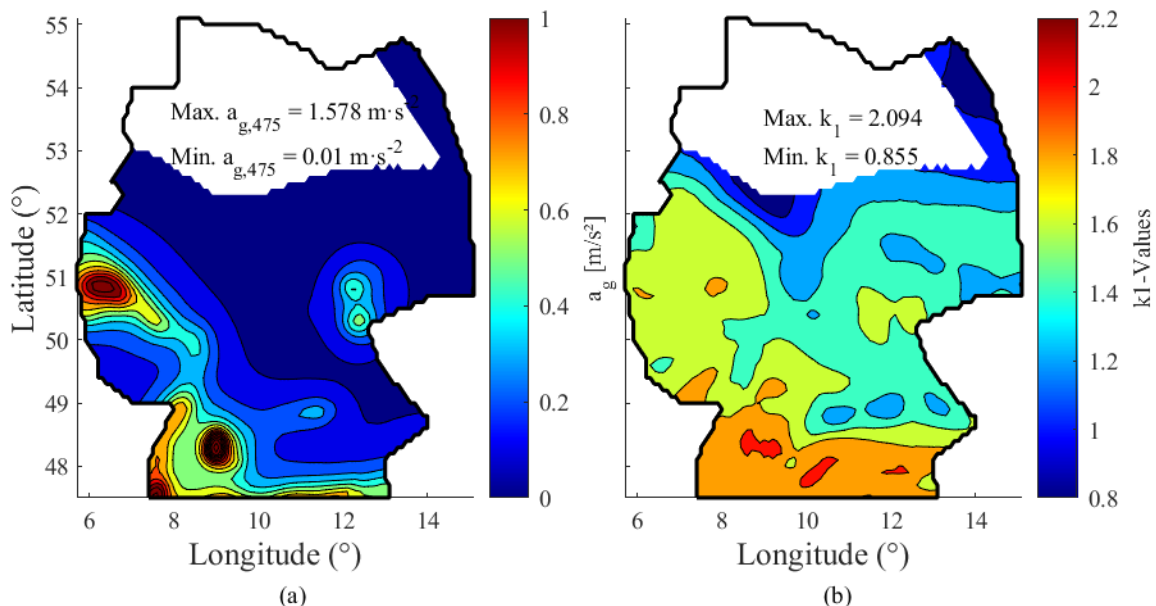


Abbildung 1: (a) Mittelwert der 475 Jahre Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung (a_{gR}); (b) die entsprechenden Steigungen (k_1 -Werte) der log-lineare Gefährdungsfunktionen.

2.3. Einfluss von k_1 auf die Bemessungs-Beschleunigung und die Bedeutungsfaktoren

Der Einfluss der Steigung der seismischen Gefährdungsfunktion k_1 auf die Bemessungs-Bodenbeschleunigung a_g ist in Abbildung 2 für Bedeutungskategorien III und IV zu sehen. Die erste

Spalte (Bild (a) und (c)) zeigt die nach Gleichung (1) mit konstanten Bedeutungsfaktoren aus Tabelle 1 berechneten Bemessungs-Bodenbeschleunigungen jeweils für Bedeutungskategorie III und IV. In Spalte zwei (Bild (b) und (d)) wurden die Bemessungs-Bodenbeschleunigungen, jeweils für Bedeutungskategorie III und IV mit den konstanten Wiederkehrperiode aus Tabelle 1 und der standortspezifische Gefährdungsfunktionen berechnet. Wie erwartet, sind die Bemessungsbeschleunigung (a) und (c) niedriger als die von (b) und (d). Dieses Ergebnis steht in direktem Zusammenhang mit den in Deutschland flacheren Gefährdungskurven, siehe Abbildung 1(b).

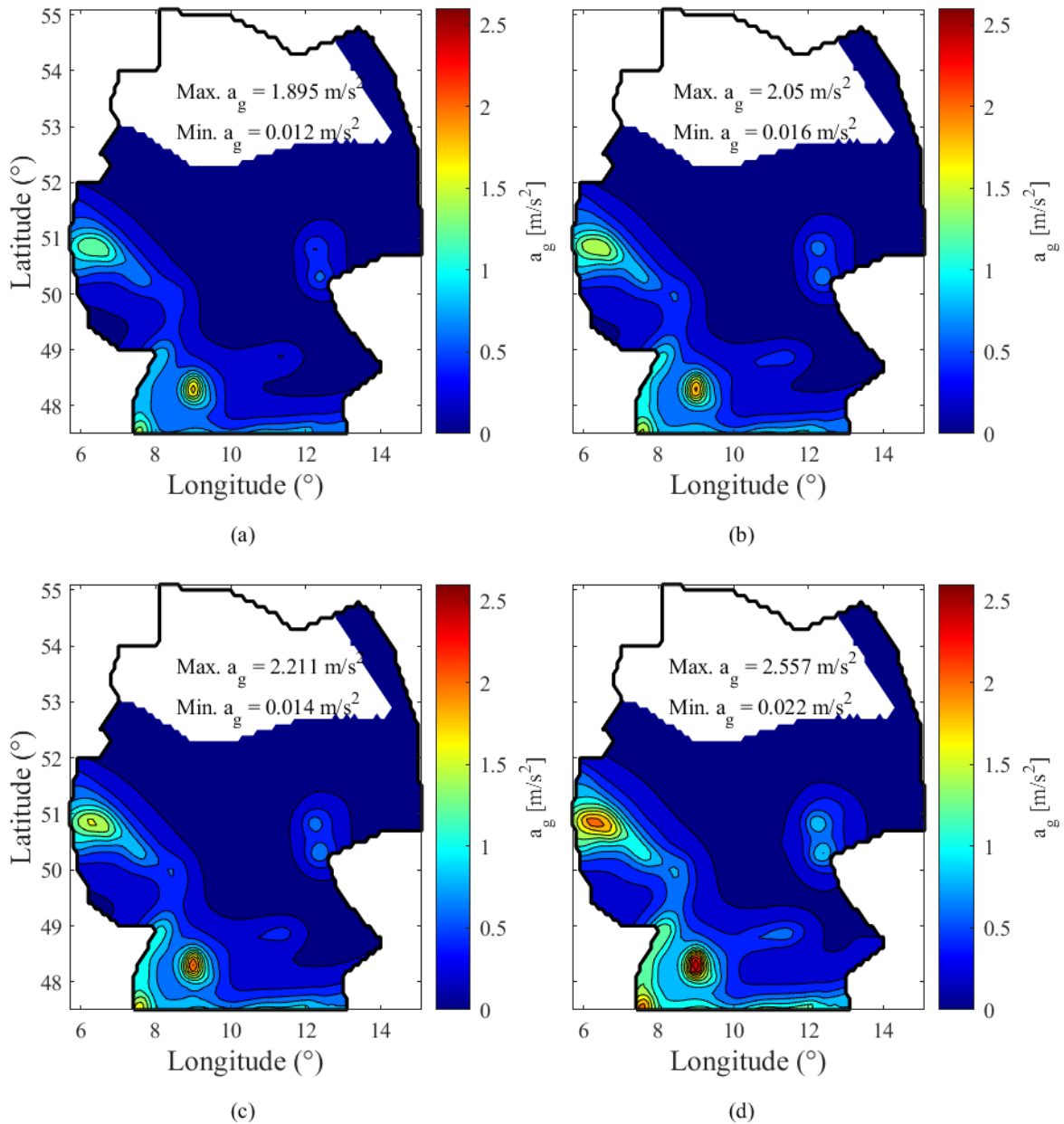


Abbildung 2: Bemessungs-Bodenbeschleunigungen (a_g) für Deutschland für Bedeutungskategorie III, (a) und (b); und Bedeutungskategorie IV (c) und (d). Die erste Spalte ((a) und (c)) wurde mit Gleichung (1) und konstanten Bedeutungsfaktoren aus Tabelle 1 ermittelt. Die zweite Spalte ((b) und (d)) wurde mit konstanten Wiederkehrperioden aus Tabelle 1 ermittelt.

Wie bereits diskutiert, führt die Verwendung konstanter Bedeutungsfaktoren bei der Berechnung der Bemessung-Bodenbeschleunigungen zu Erdbebeneinwirkungen mit ungleichmäßigen Wiederkehrperioden. Für Bedeutungskategorie III variiert die Wiederkehrperiode zwischen 555 Jahre und 696 Jahre und für Bedeutungskategorie IV zwischen 633 Jahre und 961 Jahre. Diese Werte sind deutlich kleiner als die in der Norm implizierten Werte, wenn für k_1 gleich 3,0 gewählt wird (821 und 1303 Jahre jeweils für Bedeutungskategorie III und IV). Das bedeutet, dass mit konstanten

Bedeutungsfaktoren in Deutschland Bauwerke der Bedeutungskategorie III und IV für geringere Erdbebeneinwirkungen ausgelegt werden, als in der Norm allgemein vorgesehen.

Abbildung 4 zeigt den erforderlichen Bedeutungsfaktor für Bedeutungskategorie III und IV, damit für alle Standorte eine Erbbeinwirkungen mit gleicher Wiederkehrperiode erreicht wird. Wegen der flacheren Gefährdungskurven sind diese Werte in Deutschland höher als die in der Norm vorgeschlagenen Werte. Für eine Wiederkehrperiode von 821 Jahren (Bedeutungskategorie III, Abbildung 4(a)) liegen die erforderlichen γ_I -Werte zwischen 1,30 und 1,90 und damit etwa 8–33% über dem in der Norm angegebenen Wert ($\gamma_I = 1,2$). Noch größer ist der Unterschied für eine Wiederkehrperiode von 1303 Jahren (Bedeutungskategorie IV, Abbildung 4(b)) mit γ_I -Werten zwischen 1,62 und 3,26 und damit etwa 14–55% größeren Werten als der in der Norm angegebene Wert von $\gamma_I = 1,4$.

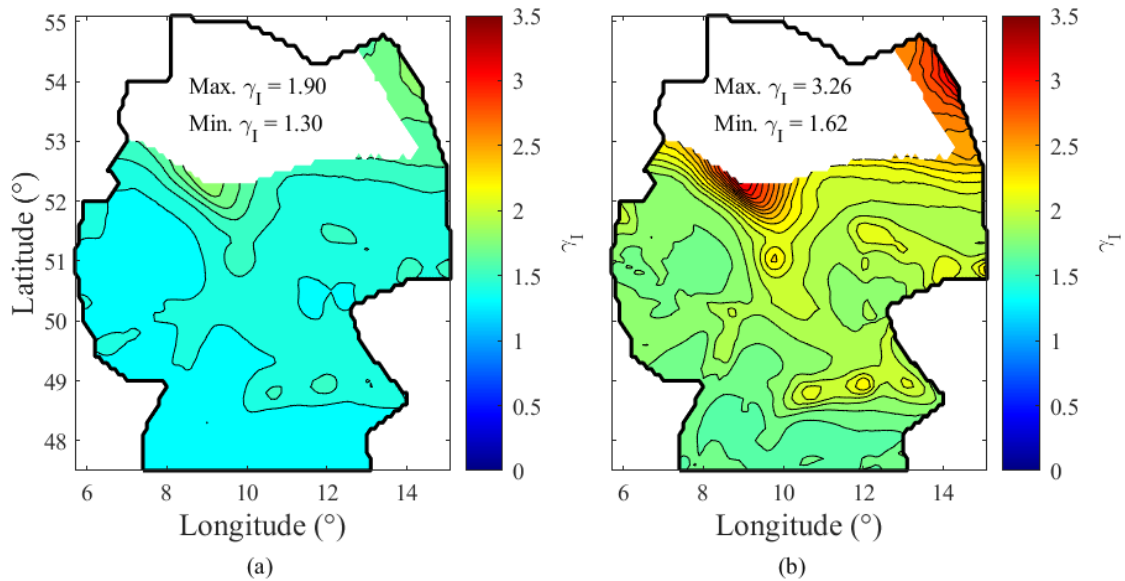


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der erforderlichen γ_I -Werte für eine einheitliche Wiederkehrperiode: (a) Bedeutungskategorie III, $T_L = 821$ Jahre; (b) Bedeutungskategorie IV, $T_L = 1303$ Jahre.

3. EINFLUSS DER BEDEUTUNGSFAKTOREN AUF DIE ZUVERLÄSSIGKEIT DER BAUWERKE

3.1. Grundlagen

Die Zuverlässigkeit von Bauwerken wird im Allgemeinen durch Schätzung ihrer mittleren jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit, λ_c , beurteilt. Dies kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_c \cong \int_0^\infty P[C|a_g, a] \cdot \left| \frac{dH(a)}{da} \right| \cdot da \quad (4)$$

Diese Gleichung besteht aus zwei Hauptkomponenten. Die erste ist die seismische Gefährdung, $H(a)$ und die zweite ist die Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks bei einem bestimmten Grad der Bodenerschütterung, $P[C|a_g, a]$, auch bekannt als Fragilitätsfunktion. Die Fragilitätsfunktion ist eine probabilistische Darstellung der Tragfähigkeit eines Bauwerkes und hängt von der Bemessungs-Bodenbeschleunigung, a_g . Wenn der Tragfähigkeit des Bauwerkes (Fragilitätskurve) als lognormale Zufallsvariable modelliert wird und die Gefährdungskurve mit der log-linearen Näherung, Gleichung (3), vereinfacht wird, kann das Integral aus Gleichung (4) geschlossen gelöst werden:

$$\lambda_c = k_0 \cdot \theta_c^{-k_1} \cdot e^{0.5k_1^2\beta_c^2} \quad (5)$$

wobei θ_c der Medianwert der Fragilitätsfunktion und β_c die lognormale Streuung der Fragilitätskurve ist.

3.2. Fragilitätskurven

Die in dieser Arbeit verwendeten Fragilitätsfunktionen basieren auf Ergebnissen einer aktuellen Untersuchung zu Fragilitätskurven für Bauwerke, die nach der Europäische Normen-Reihe ausgelegt wurden [6]. In dieser Studie wurden einfache Beziehungen zwischen der Bemessungs-Bodenbeschleunigung und dem Medianwert der Fragilitätsfunktionen für verschiedene Strukturtypologien abgeleitet.

Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Studie nur eine einzige Strukturtypologie betrachtet, nämlich biegesteife Rahmen aus Stahlbeton. Die entsprechende Zusammenhang für den Medianwert der Kapazität θ aus [6] ist

$$\theta = \max(9.19 \cdot a_g; 7,84) \quad (6)$$

Die konstanten θ -Werte (7,84 m/s²) für niedrige a_g -Werte weisen auf Strukturen hin, bei denen die Kapazität durch die Bemessung gegen nichtseismische Lastfälle wie Vertikallasten oder Windlasten bestimmt wird. Diese Kapazität wird als inhärente Kapazität bezeichnet; bei solch geringen Seismizitätsniveaus ist die Kapazität unabhängig von a_g . Für die Streuung der Fragilitätsfunktion wurde $\beta_c = 0,7$ verwendet.

3.3. Zuverlässigkeit der Bauwerke mit unterschiedlichen Bedeutungsfaktoren

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Bemessungs-Bodenbeschleunigung stark variieren kann, je nachdem, ob bei der Berechnung die Annahme eines konstanten Bedeutungsfaktors oder einer konstanten Wiederkehrperiode verwendet wird (Abbildung 2). Diese unterschiedlichen Annahmen wirken sich auch auf die Median-Kapazität des Bauwerkes aus (siehe Abbildung 5) und daher auf das Zuverlässigkeitsniveau. Abbildung 6 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeit der Bauwerke in Deutschland, berechnet mit Gleichung (5), unter Annahme der in Abbildung 2 gezeigten Bemessungs-Bodenbeschleunigung. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist erwartungsgemäß niedriger für (c) und (d) als (a) und (b), weil sie zu einer höheren Bedeutungskategorie (IV statt III) gehört und entsprechend für höhere Bemessungs-Bodenbeschleunigung ausgelegt werden. Entsprechend der Ergebnisse aus Kap.2 zeigen (b) und (d) (konstante Wiederkehrperiode) niedrigere Versagenswahrscheinlichkeiten als (a) und (c) (konstante Bedeutungsbeiwerte).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass zwar der Bedeutungsfaktor oder die Wiederkehrperiode die Zuverlässigkeit der Strukturen an einigen Standorten verändert, an anderen Orten, beispielsweise in Mittelbayern und an der Grenze zwischen Sachsen und Thüringen, jedoch unabhängig von der betrachteten Karte unverändert bleibt. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die Bemessungs-Bodenbeschleunigung klein ist und im Plateaubereich von Abbildung 5 bleibt und die Tragfähigkeit des Bauwerkes durch die erhöhte Erdbebeneinwirkungen nicht beeinflusst wird.

Aus Abbildung 6 geht hervor, dass die räumliche Variabilität des Zuverlässigkeitsniveaus nicht einheitlich ist und erheblich variiert, insbesondere in den Regionen mit höherer Seismizität. Die Abbildung weist auch darauf hin, dass es nicht möglich ist, in einem Land mit großen Regionen mit geringer Seismizität eine einheitliche seismische Zuverlässigkeit zu erreichen, weil in diesen Regionen die Erdbebeneinwirkungen nicht maßgebend sind, wie in mehreren früheren Studien [6–8] diskutiert wurde. Es ist jedoch möglich, eine gleichmäßigere Verteilung der Zuverlässigkeit in den Regionen sicherzustellen, in denen die seismische Bemessung maßgebend ist [8]. Dies kann durch den Einsatz zuverlässigkeitsorientierter Auslegungsverfahren erreicht werden.

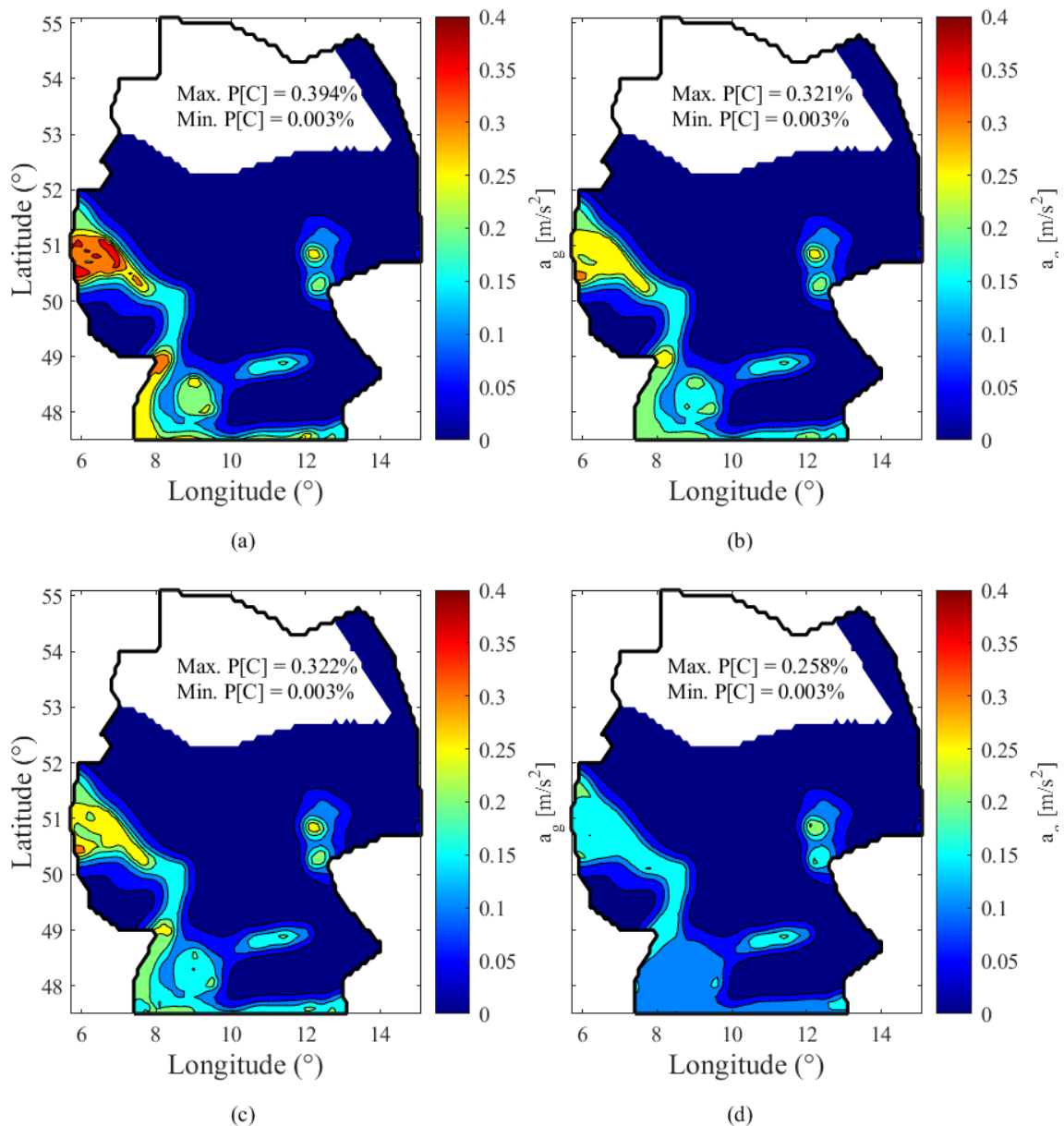


Abbildung 4: Versagenswahrscheinlichkeit, $P[C]$ in % in 50 Jahre in Deutschland für Bedeutungskategorie III, (a) und (b); und Bedeutungskategorie IV (c) und (d). Die erste Spalte ((a) und (c)) wurde mit Gleichung (1) und den konstanten Bedeutungsfaktoren aus Tabelle 1 ermittelt. Die zweite Spalte ((b) und (d)) wurde mit die konstanten Wiederkehrperioden aus Tabelle 1 ermittelt.

4. ZUVERLÄSSIGKEITSORIENTIERTE SEISMISCHE AUSLEGUNG

4.1. Grundlagen

Zuverlässigkeitsorientierte Auslegungsverfahren unterscheiden sich von gefahrungs-basierten Auslegungsverfahren dadurch, dass das Ziel nicht darin besteht, sicherzustellen, dass die Tragfähigkeit und Duktilität des Bauwerkes ausreicht, um die Erdbebeneinwirkungen mit einer bestimmte Referenz-Wiederkehrperiode zu übertreffen, sondern sicherzustellen, dass das Bauwerke eine festgelegte angestrebte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit hat. Diese Methoden stellen eine Verbesserung gegenüber den gefahrungs-basierten Methoden dar, weil sie bei der Bestimmung der seismischen Bemessungskräfte sowohl die Tragfähigkeit des Bauwerkes als auch die gesamte seismische Gefährdung am Standort berücksichtigen.

In der Literatur wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen, um die angestrebte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit zu erreichen. Mit der einfachsten Methode, den risikoorientierten Spektren [9], wird versucht, die Bemessungs-Bodenbeschleunigung zu bestimmen, die das Bauwerk eine Tragfähigkeit gibt, damit es die Zielversagenswahrscheinlichkeit erreichen kann. Diese Bemessungs-Bodenbeschleunigung, $a_{g,risk}$, kann ermittelt werden, indem die Gleichung (5) nach θ_c aufgelöst wird, um das gewünschte λ_c -Wert zu erhalten. Dann kann die a_g - θ_c -Beziehung aus Gleichung 6 verwendet werden, um den erforderlichen $a_{g,risk}$ -Wert zu bestimmen.

4.2. Zielzuverlässigkeitsniveau

Bei der zuverlässigkeitsorientierten Auslegung wird zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Bauwerken statt der Verwendung des Bedeutungsfaktors ein strengeres Zielzuverlässigkeitsniveau vorgegeben, das die Bauwerke erreichen müssen. Diese ist ein logischeres Vorgehen als die Verwendung von Bedeutungsfaktoren, weil es zu Bauwerken mit einer garantierten Mindestkapazität führt, welche das aktuelle, gefährdungsbasierte Verfahren nicht bietet. Die Schwierigkeit besteht darin, zu entscheiden, welches Zuverlässigkeitsniveau für jeden Bedeutungsfaktor gewählt wird. Die Wahl eines Werts für die Zielversagenswahrscheinlichkeit kann schwierig sein, weil er mit dem Risikoniveau zusammenhängt, das eine Gemeinschaft bereit ist zu akzeptieren. Diese Werte liegen bei normalen Strukturen (Bedeutungskategorie II) tendenziell zwischen 1×10^{-5} Jahr und 5×10^{-4} pro Jahr. Im informativen Anhang der zweiten Generation des Eurocode 8 wird für die zuverlässigkeitsbasierte Entwurfsüberprüfung derzeit ein Wert von 2×10^{-4} pro Jahr vorgeschlagen. Es ist erwähnenswert, dass mehrere Studien darauf hinweisen, dass dieser Wert zu hoch ist unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Verlusts von Menschenleben [7,10] und schlagen Werte im Bereich von 5×10^{-5} und 1×10^{-5} vor. Kennedy [11] bewertete Kernkraftwerke und stellte fest, dass die erreichte Häufigkeit seismischer Kernschäden zwischen $0,6 \times 10^{-6}$ und 6×10^{-6} liegt. Diese letzte Werte sind offensichtlich repräsentativ für die Versagensraten extrem kritischer Anlagen und liegen über dem, was in den allgemeinen Baukonstruktionsnormen zu erwarten ist.

Wenn die angestrebte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit auf akzeptablen jährlichen Sterberaten basiert, wirkt sich die zusätzliche Unsicherheit der Schätzungen dieser Sterberaten auf die angestrebte jährliche Einsturzwahrscheinlichkeit aus. Beispielsweise können die Sterberaten für Stahlbeton Rahmen zwischen 15 % und 50 % variieren [12], sofern ein Einsturz stattgefunden hat, was zu angestrebten jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit von $3,3 \times 10^{-5}$ und 1×10^{-5} führen würde, wenn eine akzeptable jährliche Todesrate von 5×10^{-6} erreicht wäre. Welchen Einfluss die unterschiedlichen Versagenswahrscheinlichkeit auf den zuverlässigkeitsbasierten Design-PGA haben, wird im nächsten Abschnitt dargestellt. Allerdings liegt die Empfehlung eines akzeptablen Werts außerhalb des Rahmens dieser Studie.

4.3. Spitzenbodenbeschleunigung für verschiedene Zielzuverlässigkeitsniveaus

Mit dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Verfahren wurden für Deutschland die zuverlässigkeitsorientierten Bodenbeschleunigungen für vier Zuverlässigkeitsstufen berechnet, die repräsentativ für Werte in der überprüften Literatur sind. Folgende Ziel-Versagenswahrscheinlichkeiten wurden berücksichtigt: 1×10^{-4} , 5×10^{-5} , 1×10^{-5} , 5×10^{-6} pro Jahr. Die Werte sind jedoch nicht dazu gedacht, bestimmten Bedeutungskategorien zu entsprechen. Der Zusammenhang zwischen Bedeutungskategorien und der akzeptablen jährlichen Versagenswahrscheinlichkeiten liegt außerhalb des Rahmens dieser Studie. Die $a_{g,risk}$ -Werte sind in Abbildung 7 dargestellt.

In den weißen Bereichen der Bilder in Abbildung 7 konnte $a_{g,risk}$ nicht definiert werden, weil in diesen Regionen die Seismizität so klein ist, dass die inhärente Tragfähigkeit des Bauwerks zu einem jährliche Versagenswahrscheinlichkeiten führt, der unter dem Zielwert liegt. Interessant ist, dass bei Verwendung eines λ_c -Werts gleich 2×10^{-4} , wie im aktuellen Entwurf der neuen Generation DIN EN 1998-1-2 vorgeschlagen, keine Werte für $a_{g,risk}$ ermittelt werden konnten. Dies bedeutet, dass in Deutschland die Eigenkapazität der Bauwerke ausreicht, um eine angemessene Zuverlässigkeit zu gewährleisten, ohne dass eine spezielle seismische Auslegung erforderlich ist. Mit steigendem Zuverlässigkeitsniveau nehmen die Bereiche zu, in denen $a_{g,risk}$ bestimmt werden konnte.

Für die kleine Anzahl von Standorten, an denen $a_{g,risk}$ für einen λ_c -Wert gleich 1×10^{-4} (Abbildung 7(a)) bestimmt werden konnte, ist $a_{g,risk}$ niedriger als die Referenz-Bodenbeschleunigung, a_{gR} , für 475 Jahre.

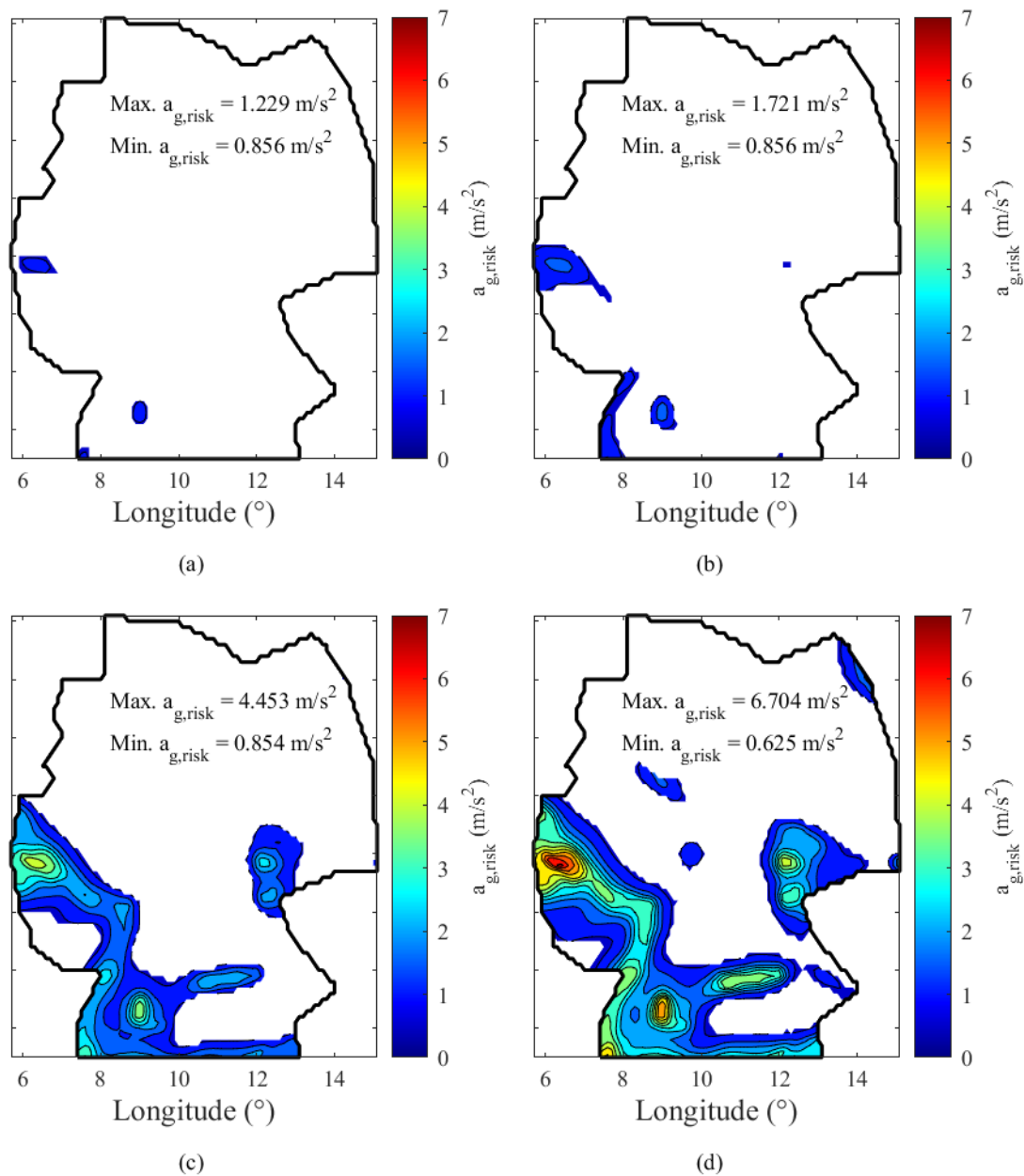


Abbildung 5: Zuverlässigkeitsorientierte Bodenbeschleunigungen für verschiedene angestrebte jährliche Versagenswahrscheinlichkeiten, λ_c . (a) $\lambda_c = 1 \cdot 10^{-4}$, (b) $\lambda_c = 5 \cdot 10^{-5}$, (c) $\lambda_c = 1 \cdot 10^{-5}$, (d) $\lambda_c = 5 \cdot 10^{-6}$.

4.4. Zuverlässigkeitsorientierte Erdbebenzonen

Die Tatsache, dass die inhärente Kapazität in Gebiete mit geringer Seismizität zu einer geringeren Versagenswahrscheinlichkeit als die Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit führt, ermöglicht es, die Bereiche zu überarbeiten, in denen eine seismische Auslegung erforderlich ist. Derzeit schlägt die DIN EN 1998-1 vor, dass für Standorte mit a_g kleiner als $0,5 m/s^2$ keine Erdbebenbemessung erforderlich ist [2]. Auf Basis der hier durchgeführten Studien können hingegen Gebiete definiert werden, in denen aufgrund der inhärenten Kapazität keine seismische Auslegung erforderlich ist. Diese Definition könnte erhebliche Auswirkungen auf die Auslegung von Bauwerken in Regionen mit geringer Seismizität haben, wie etwa in Deutschland, wo je nach gewähltem Zuverlässigkeitsgrad der seismische Entwurf vernachlässigt werden könnte. Wenn ein Bauwerke von höherer Bedeutung und eine entsprechend höhere Zuverlässigkeitsniveau entworfen werden soll, reicht die inhärente Kapazität möglicherweise nicht mehr aus, um eine angemessene Tragfähigkeit sicherzustellen. In diesem Fall ist wird sich das

Gebiet, in dem eine seismische Auslegung erforderlich ist, vergrößern. Dies wird in Abbildung 6(d) durch den vergrößerten Bereich deutlich, in dem $a_{g,risk}$ im Vergleich zu Abbildung 6(a) bestimmt werden konnte. Bei Standorten mit niedrigeren k_1 -Werten kann der Anstieg des $a_{g,risk}$ zum Erreichen der angestrebten jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit hoch sein. An Standorten mit einer außergewöhnlich flachen Gefährdungskurve (k_1 -Werte kleiner als 1,1) ist für λ_c gleich 5×10^{-6} (Abbildung 7(b)) $a_{g,risk}$ bis zu einem Faktor 20 und mehr höher. Die meisten Standorte in Deutschland haben k_1 -Werten zwischen 1,4 und 2,2 und Vergrößerungsfaktoren im Allgemeinen zwischen 3 und 10.

Aus Sicht des Praktikers würde sich der Aufwand für die Anwendung dieser zuverlässigkeitsorientierte Auslegungsmethode kaum im Vergleich zum aktuellen Verfahren unterscheiden, da sich lediglich die Werte in den Erdbebenkarten ändern. Die zusätzliche Arbeit, die bei der Implementierung dieser Methode erforderlich ist, würde denjenigen zufallen, die für die Entwicklung der Norm verantwortlich sind, und sich auf die Auswahl eines geeigneten Fragilitätskurvenmodells und die Auswahl geeigneter angestrebte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit für die verschiedenen Zuverlässigkeitsniveaus konzentrieren. Aufgrund anderer Aspekte des Auslegungsverfahrens, wie z. B. der Verwendung konstanter Verhaltensfaktoren, ist die Genauigkeit der Risikoausrichtung mithilfe dieser Karten leider verringert, sie führen jedoch immer noch zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Zuverlässigkeitsniveaus über ein Gebiet [13]. Dies stellt nicht nur eine Verbesserung gegenüber dem aktuellen Entwurfsverfahren in der Norm dar, sondern auch das Zielzuverlässigkeitsniveau und die Ableitung der Bemessungserdbebeneinwirkungen sind transparenter.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Studie wurde untersucht, wie die Definition der Bedeutungsfaktoren und die standortspezifische, seismische Gefährdung die Bemessungs-Bodenbeschleunigung für verschiedene Bedeutungskategorien beeinflussen. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Philosophie, alle Bauwerke auf ein einheitliches Gefährdungsniveau auszulegen, bei Verwendung konstanter Bedeutungsfaktoren nicht eingehalten wird. Im Fall von Deutschland, wo die Erdbebengefährdungskurven durch flache Steigungen gekennzeichnet sind, kann die Verwendung konstanter Bedeutungsfaktoren die Bemessungs-Bodenbeschleunigung unterschätzen. Dies führt zu einer geringeren Zuverlässigkeit als in der Norm vorgesehen. Anschließend wurde gezeigt, wie die zuverlässigkeitsorientierte Bemessungs-Bodenbeschleunigung ermittelt werden kann, um die seismische Zuverlässigkeit in Regionen höherer Seismizität für unterschiedliche Zielzuverlässigkeitsniveaus zu homogenisieren. Abschließend wurde diskutiert, wie Zonen definiert werden können, für die aufgrund der inhärenten Kapazität von Bauwerken keine Erdbebenauslegung erforderlich ist, um ein bestimmtes Zuverlässigkeitsniveau zu erreichen. Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf konzentrieren, zu bestimmen, welche Zielzuverlässigkeitsniveaus für jede der verschiedenen Bedeutungskategorie geeignet wären und wie die entsprechenden Bereiche, in denen eine seismische Auslegung erforderlich ist, im Vergleich zur bestehenden Norm abschneiden.

LITERATUR

- [1] DIN. Nationaler Anhang-National festgelegte Parameter-Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben-Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, mit CD-ROM. Berlin: 2021.
- [2] DIN. Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, Deutsch Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. Berlin: 2010.
- [3] Cornell CA. Calculating building seismic performance reliability - a basis for multi-level design norms. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco: Pergamon; 1996.
- [4] Grünthal G, Stromeyer D, Bosse C, Cotton F, Bindi D. The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties

and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2018;16:4339–95. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>.

- [5] Grünthal G, Stromeyer D, Bosse C. The data sets of the earthquake model for the probabilistic seismic hazard assessment of Germany, version 2016 - Technical Report STR17/05 - Data. Potsdam: 2017. <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-17056>.
- [6] Clemett N, Rapps C, Gündel M. Evaluation of typology-specific fragility curves used for risk-targeted seismic demand maps in regions of low seismicity: A German case-study. *Earthq Eng Struct Dyn* 2023. <https://doi.org/10.1002/EQE.3911>.
- [7] Silva V, Crowley H, Bazzurro P. Exploring risk-targeted hazard maps for Europe. *Earthquake Spectra* 2016;32:1165–86. <https://doi.org/10.1193/112514EQS198M>.
- [8] Baltzopoulos G, Grella A, Iervolino I. Seismic reliability implied by behavior-factor-based design. *Earthq Eng Struct Dyn* 2021;50:4076–96. <https://doi.org/10.1002/EQE.3546>.
- [9] Luco N, Hamburger RO, Klemencic M, Seattle A, Jeffrey W, Kimball K. Risk-Targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States. Conference Proceedings SEAOC 2007, Squaw Creek: ASCE; 2007.
- [10] Horspool N, Gerstenberger MC, Elwood KJ. Risk Targeted Hazard Spectra for Seismic Design in New Zealand. New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Conference, Christchurch: New Zealand Society for Earthquake Engineering; 2021.
- [11] Kennedy RP. Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design* 2011;241:648–56. <https://doi.org/10.1016/J.NUCENGDES.2010.08.001>.
- [12] So E. *SPRINGER BRIEFS IN EARTH SCIENCES Estimating Fatality Rates for Earthquake Loss Models*. Springer; 2016.
- [13] Spillatura A. Scuola Universitaria Superiore IUSS Pavia From Record Selection to Risk Targeted Spectra for Risk based Assessment and Design *EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING SEISMOLOGY/ RISK AND EMERGENCY MANAGAMENT / WEATHER RELATED RISK* Obtained in the framework of the Doctoral Programme in Understanding and Managing Extremes 2017.